UNTERSUCHUNGEN ÜBER DIE BEEINFLUSSUNG DER LÄNGE DER VON EINEM RIGHI'SCHEN ERREGER AUSGESANDTEN ELEKTRISCHEN WELLEN DURCH DRÄHTE, WELCHE DER PRIMÄRLEITUNG ANGEHÄNGT WERDEN.

VON DER PHILOSOPHISCHEN FACULTÄT

DER

UNIVERSITÄT ROSTOCK

GEKRÖNTE PREISSCHRIFT

VERFASST

VON

ADOLF LINDEMANN

AUS GÜSTROW.

ACAD. LUGD. BAT. BIBL.

LEIPZIG,

JOHANN AMBROSIUS BARTH.

1900.

Druck von Metzger & Wittig in Leipzig.

Die folgenden Untersuchungen liefern einen Beitrag zu der bereits mehrfach erörterten Frage[1]) nach der Wirkungsweise der an die Primärleitung eines Righi'schen Erregers angehängten Drähte, welche den charakteristischen Teil der Versuchsanordnung ausmachen, welche Marconi für seine drahtlose Telegraphie verwendet.

Das specielle Ziel der Arbeit ist die experimentelle Untersuchung der Veränderungen, welche die Länge der von dem Erreger ausgesandten elektrischen Wellen durch die Anhängung der Drähte erleidet und damit die genaue Erforschung der Schwingungsvorgänge, wie sie sich in einem derartig abgeänderten Erreger abspielen.

Untersuchungsmethode.

Die Bestimmung der Wellenlänge eines Hertz'schen Erregers begegnet Schwierigkeiten wegen der verschiedenen Dämpfung, welche elektrische Schwingungen in dem Erreger und einem Resonator erfahren. Die Dämpfung der Erregerschwingungen ist nämlich sehr gross, sodass die sehr geringe Dämpfung der Schwingungen in einem Resonator dagegen vernachlässigt werden kann. Die Folge davon ist die zuerst von Sarasin und de la Rive[2]) beobachtete und seitdem vielfach beleuchtete Erscheinung der multiplen Resonanz, welche darin besteht, dass man bei den gebräuchlichen Wellenlängebestimmungen Hertz'scher Schwingungen durch Resonatoren nicht

1) M. Ascoli, Beibl. **22.** p. 610. 1898; Martin Tietz, Elektrotechn. Zeitschr. XIX. p. 562. 1898; vgl. auch Slaby, Funkentelegraphie p. 5. Berlin 1897.

2) E. Sarasin u. L. de la Rive, Beibl. **14.** p. 419. 1890; Arch. de Genève (3) **23.** p. 113. 1890.

die Wellenlänge des Erregers, sondern die des verwandten Resonators erhält. Anders scheinen allerdings die Verhältnisse zu liegen, wenn man, wie dies in letzter Zeit geschehen ist[1]), den Cohärer zur Messung der Wellenlänge verwendet. Nach den vorliegenden Untersuchungen scheint dieser direct die Wellenlänge des Erregers zu ergeben. Die Bestimmung der Wellenlänge mit dem Cohärer ist jedoch eine so schwierige, dass eine Untersuchung der im Folgenden zu beobachtenden, teilweise recht schwachen Wirkungen nach diesem Verfahren von vornherein aussichtslos erschien. Ich verzichtete deshalb auf eine Anwendung desselben und maass die Länge der Erregerwellen nach einer Methode, welche auf der Möglichkeit einer Abstimmung resonirender Systeme beruht. Eine Abstimmung kann man nämlich bei den vorliegenden Apparaten dadurch erreichen, dass man mit der Länge eines Resonators dessen Eigenschwingung verändert und mit Hülfe eines Apparates, der die Intensität der im Resonator herrschenden Schwingung zu messen gestattet, z. B. eines Thermoelementes, diejenige Länge bestimmt, für welche das Ansprechen des Resonators sein Maximum erreicht. Nimmt man nun an, dass für diese Resonatorlänge Primär- und Secundärleiter isochrone Schwingungen machen, so giebt eine Bestimmung der dem letzteren zukommenden Wellenlänge zugleich die des ersteren.[2]) In seiner ausführlichen mathematischen Darstellung der elektrischen Resonanz hat nun Hr. Victor Bjerknes[3]) nachgewiesen, dass wegen der verhältnismässig grossen Dämpfung der elektrischen Wellen die Isochronität beider Leiter im allgemeinen nicht genau mit dem Maximum des Ansprechens des Resonators zusammenfällt; zugleich giebt er eine Methode an, wie man auf graphischem Wege aus der „Resonanzcurve", der Curve, welche man erhält, wenn man die den Wellenlängen der Eigenschwingungen proportionalen Resonatorlängen als Abscissen, die zugehörigen Ausschläge als Ordinaten aufträgt, diesen „Isochronitätspunkt" der Curve bestimmen kann.

1) A. le Royer u. P. v. Berchem, Beibl. **19**. p. 93. 1895; O. Behrendsen, Wied. Ann. **66**. p. 1024. 1898.

2) Die Methode ist bereits von I. Klemenčič und P. Czermak (Wied. Ann. **50**. p. 174. 1893) angewandt worden.

3) V. Bjerknes, Wied. Ann. **55**. p. 121. 1895.

Thatsächlich liegt nun jedoch dieser Isochronitätspunkt meistens der Spitze des Maximums so nahe, dass, namentlich bei der Beobachtung sehr kleiner Wellen, der durch Identificirung derselben entstehende Fehler die Beobachtungsfehler nicht wesentlich übersteigt. In den folgenden Untersuchungen, bei denen zudem geringe Fehler in den Bestimmungen von Wellenlängen ohne Einfluss auf das Endresultat waren, wurde deshalb der zwischen ihnen bestehende Unterschied durchweg vernachlässigt.

Apparate.

Die bei den Versuchen benutzten Apparate wichen, um für Laboratoriumsuntersuchungen geeignet zu sein, namentlich hinsichtlich ihrer Dimensionen etwas von den für die praktische Ausübung der Funkentelegraphie gebräuchlichen Apparaten ab.

Die Anordnung des verwandten Righi'schen Erregers wurde dem Buche Slaby's über Funkentelegraphie entnommen. Die massiven Erregerkugeln waren von Messing und hatten einen Durchmesser von 3,4 cm. Ihr gegenseitiger Abstand — die Länge des Oelfunkens — war zu reguliren, er wurde jedoch bei allen Versuchen ungefähr gleich 0,7 mm erhalten, da der Erreger bei diesem Abstande am besten wirkte. Da die Oberfläche der Kugeln vom Funkenstrom ziemlich stark angegriffen wurde, so hielt ich es, um constante Wirkung zu erzielen, für nötig, die Kugeln von Zeit zu Zeit zu reinigen und das zum Funkenübergange benutzte Paraffinöl zu filtriren, bez. durch neues zu ersetzen. Die Zuleitung zu den Erregerkugeln vermittelten zwei in ihrem Abstande verstellbare Messingkugeln von ca. 1 cm Durchmesser, die an je einem senkrecht zur Axe des Erregers stehenden Drahte befestigt und durch diese mit dem Inductorium verbunden waren. Ausserdem waren die Zuführungskugeln noch mit je einer Klemmschraube zur Aufnahme der anzuhängenden Drähte versehen.

Bei sämtlichen Versuchen wurde der Erreger ohne Hohlspiegel benutzt. Würde dieser nämlich nicht zufällig eine Brennweite von genau einem ungeraden Vielfachen des vierten Teiles der dem Erreger eigenen Wellenlänge besitzen, so würde er, wegen der Interferenz der von ihm reflectirten und der direct vom Erreger ausgesandten Strahlen, eine Verschiebung

des Resonanzmaximums veranlassen und somit die Bestimmung der Länge der Erregerwellen unmöglich machen.

Als Stromquelle diente ein durch einen Gleichstrom von 110 Volt gespeistes Inductorium, dessen Unterbrechung durch einen Wehneltunterbrecher mit regulirbarer Elektrode[1]) betrieben wurde. Bei der verwandten Stromstärke von 5 bis 6 Amp. betrug die Funkenweite ungefähr 10 cm. Die Anwendung des Wehneltunterbrechers stiess zunächst insofern auf Schwierigkeiten, als bei den Versuchen meist nur verhältnismässig kleine Funkenstrecken verwandt werden mussten. Dadurch wurde zuweilen die Selbstinduction in der Primärspule des Inductoriums so stark herabgemindert, dass ein Aussetzen des Unterbrechers eintrat. Durch Vorschaltung einiger Selbstinductionsspulen liess sich jedoch dieser Uebelstand recht vollkommen beseitigen.

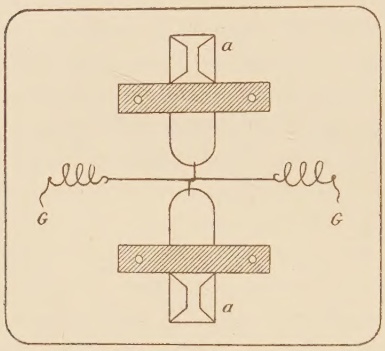

Fig. 1.

Zur Beobachtung der elektrischen Wellen verwandte ich ausschliesslich Thermoelemente. Der geradlinige Resonator hatte die in Fig. 1 in natürlicher Grösse abgebildete Form.

Zwei 6 mm breite und ca. 18 mm lange Streifen von dünnem Kupferblech wurden durch Ebonitstreifen in ihrer Lage erhalten. Das nach aussen gerichtete Ende dieser Blechstückchen war mit umgebogenen Ansätzen versehen, sodass ein weiterer Metallstreifen hineingesteckt und so die Länge des Resonators verändert werden konnte. Das in der Mitte befindliche Thermoelement, bestehend aus einem Eisen- und einem Constantandrahte, beide von 0,025 mm Durchmesser[2]), war in der von Klemenčič[3]) angegebenen Weise angeordnet. Die durch die Joule'sche Wärme der Resonatorschwingungen im

1) Es wurde eine der von A. Wehnelt, Wied. Ann. **68.** p. 265. 1899 oben angegebenen Anordnung ganz ähnliche verwandt.

2) Bezogen von Hartmann & Braun, Frankfurt a. M.-Bockenheim.

3) I. Klemenčič, Wied. Ann. **45.** p. 78. 1892.

Thermoelemente erregte elektromotorische Kraft wurde mit Hülfe eines d'Arsonvalgalvanometers beobachtet, dem zur Verminderung der Ueberaperiodicität ein grösserer Ballastwiderstand vorgeschaltet wurde. Der Resonator wurde, wie der Erreger, ohne Hohlspiegel verwendet.

Bei einigen Versuchen liess es sich nicht vermeiden, dass durch die Entladungen des Inductoriums auch in den Zuleitungen zum Resonator Ströme inducirt wurden, die auch ihrerseits wieder eine Erwärmung des Thermoelementes verursachten. In den Fällen, wo diese Erwärmung die Resultate beeinflussen konnte, wurde deshalb die Grösse des entstehenden Fehlers mit Hülfe eines Thermoelementes bestimmt, dass sich von dem obigen insofern unterschied, als hier die dort an den Kupferstreifen des Resonators befestigten Enden der Drähte des Thermoelementes an kleine, in das Grundbrett geschlagene Metallstifte gelötet waren. Im übrigen wurde jedoch das Correctionselement dem Elemente des Resonators in seiner geometrischen Gestalt möglichst gleich gemacht.

Versuche.

Vermittelst der beschriebenen Apparate wurde zunächst nach der oben angegebenen Methode die Wellenlänge des Erregers ohne Drähte bestimmt. Beim Resonanzversuch befand sich der Resonator in einer Entfernung von ungefähr 60 cm vom Erreger. In die Enden $a\,a'$ des ersteren wurden kurze Stücke Kupferblech gesteckt, an die Streifen von starkem Stanniol gelötet waren. Durch Abschneiden wurden dann diese Streifen von beiden Seiten gleichmässig verkürzt, wobei die jeweilige Resonatorlänge an einer auf die Stanniolstreifen geklebten Papierscala abzulesen war. Für jede Länge des Resonators wurde der durch 10 sec langes Einschalten des Erregers am Galvanometer erreichte Ausschlag abgelesen. Die Mittelwerte aus je vier bis fünf untereinander wenig verschiedenen Ablesungen sind in Fig. 2 verzeichnet. Die so erhaltenen Punkte bilden eine Curve, welche ein deutliches Maximum für eine Resonatorlänge von 10,5 cm und in einer Periode von der Hälfte dieser Länge auf das erste folgend noch drei weitere, allerdings nur schwach angedeutete Maxima zeigt.

Für den 10,5 cm langen Resonator wurde alsdann die Wellenlänge bestimmt. Es geschah dies durch Ausmessung der durch Reflexion an einer 2 m vom Erreger aufgestellten grossen Zinktafel gebildeten stehenden Wellen. Die Resultate der Messung giebt Fig. 3 wieder. Es zeigt sich, dass die Entfernung zweier Knotenpunkte nicht merklich von der Länge des Resonators abweicht. Zugleich giebt die Curve ein gutes Bild von der Grösse der Dämpfung der beobachteten Schwingungen. Indem wir nun die doppelte Entfernung zweier Knotenpunkte, 21 cm, als die dem Erreger eigene Wellenlänge annehmen, gewinnen wir zugleich eine Erklärung der in der Resonanzcurve auftretenden periodischen schwachen Maxima. Für die diesen Punkten der Curve entsprechenden Resonatorlängen wird nämlich eine der Oberschwingungen desselben mit den Erregerschwingungen in Resonanz sein. Merkwürdig ist dabei, dass diese Resonanz auch für Längen des Resonators eintritt, welche ungerade Viertel der Wellenlänge des Erregers betragen. Da nämlich an den freien Enden des Resonators Bäuche auftreten müssen, so kann man sich für diesen Fall von der Verteilung der Knoten und Bäuche im Resonator kaum eine Vorstellung machen. Die Schwäche der drei letzten Resonanzmaxima denke ich mir dadurch entstanden, dass bei der geringen Ausdehnung des Erregers die Anfangsenergie der im Resonator erregten Schwingungen mit der Länge desselben nicht erheblich grösser wird, während ihre Dämpfung mit seiner Länge wesentlich zunimmt, da ein Resonator um so mehr Energie ausstrahlen und in Joule'sche Wärme umwandeln wird, je länger er ist.

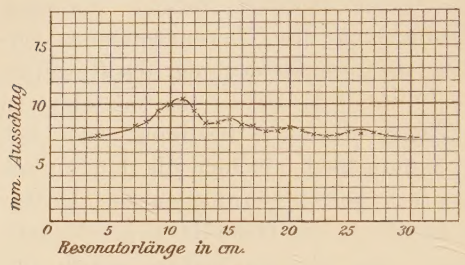

Fig. 2.

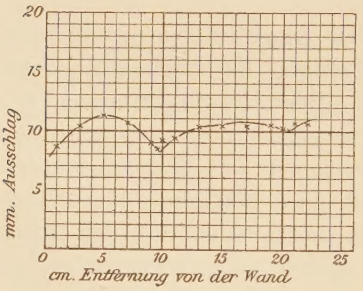

Fig. 3.

Für den Resonanzversuch wären allerdings nach den Untersuchungen von Bjerknes über das Absorptionsvermögen von Metallen für elektrische Schwingungen[1]) vollständig aus Kupfer bestehende Resonatoren zweckmässiger gewesen, als solche, welche, wie die verwandten, teilweise aus Zinn bestehen; da jedoch nach denselben Untersuchungen auch bei Verwendung letzteren Materiales ein deutliches Resonanzmaximum zu beobachten sein musste, so zog ich, des bequemeren Arbeitens wegen, seine Anwendung vor.

Der Resonanzversuch unterliegt, wohl namentlich wegen der Kleinheit der benutzten Wellen, verschiedenen störenden Einflüssen, deren Beseitigung oft nicht ganz leicht ist. Vor allem müssen irgendwie dem Resonator parallele, selbst dielektrische Körper aus seiner Nähe entfernt werden, da sie durch Verursachung von Reflexionen und secundären Wellen das Resonanzbild trüben. So zwang mich die Reflexion der Wellen an den senkrechten Stativen, die zunächst verwandte verticale Stellung von Erreger und Resonator aufzugeben und eine horizontale Anordnung zu wählen. Ganz besonders muss darauf Rücksicht genommen werden, dass die Zuleitungsdrähte zum Oscillator sowohl wie zum Resonator genau rechtwinklig auf diese zugeführt werden, sodass etwaige in ihnen erregte Schwingungen nicht auf den Resonator einwirken können. Die durch Nichtbeachtung dieser Vorsicht entstehenden Störungen sind ganz besonders starke.

Nachdem so die Wellenlänge des Erregers bestimmt war, wurde zur eigentlichen Untersuchung der Veränderungen geschritten, welche die Anhängung von Drähten in der elektrischen Strahlung des Erregers hervorbringt. In Bezug auf die Drähte müssen zwei Versuchsanordnungen unterschieden werden. Die von Marconi herrührende, bei der praktischen Ausübung der Funkentelegraphie gebräuchliche Anordnung ist die, dass man die eine Zuführungskugel des Erregers mit einem frei ausgespannten Drahte, der Luftleitung, verbindet, die andere zur Erde ableitet. Als Empfangsapparat verwendet man dann einen gleichfalls einseitig mit der Erde verbundenen und mit Luftleitung versehenen Indicator für elektrische Wellen.

---

1) V. Bjerknes, Wied. Ann. 47. p. 69. 1892.

Eine andere Anordnung, die allerdings bisher wohl lediglich für Versuchszwecke verwandt worden ist, ergiebt sich, wenn man die Erdleitung fortlässt und statt dessen jede der beiden Zuführungskugeln mit einem frei ausgespannten Drahte versieht. Die letztere Anordnung hat den Vorzug grösserer Uebersichtlichkeit und ist zudem die für Laboratoriumsversuche geeignetere. Ich legte diese deshalb zunächst bei meinen Versuchen zu Grunde.

Resonanzuntersuchungen bei angehängten Drähten hat bereits Hr. Martin Tietz[1]) ausgeführt, in der Absicht, die sich eventuell ergebende Möglichkeit einer Abstimmung für die praktische Ausführung der Funkentelegraphie nutzbar zu machen. Für die zuletzt besprochene Versuchsanordnung findet er, dass das Ansprechen des Resonators ein sehr scharfes Maximum erreicht, wenn die Drähte am Erreger und Empfänger gleiche Länge haben.

Aus diesem Versuchsresultate geht hervor, dass der Erreger nach Anhängung der Drähte Schwingungen von wesentlich grösserer Wellenlänge aussendet. Bei der Ausmessung der von einem solchen Erreger an einer Metallwand erzeugten stehenden Wellen mit einem isochronen Resonator, dessen Länge aus noch zu besprechenden Resonanzversuchen entnommen war, erhielt ich in der That ein ausgesprochenes Wellenbild; in dem, wie zu erwarten war, die Entfernung zweier Knoten, also die halbe Wellenlänge der gemessenen Schwingung, nicht wesentlich von der Entfernung der beiden äusseren Drahtenden am Erreger abwich.

Nach diesen Ergebnissen scheint also die Wirkungsweise der Drähte einfach darin zu bestehen, dass sie zusammen mit den Erregerkugeln, die mit ihnen durch die Luftfunkenstrecken leitend verbunden sind, einen einzigen Hertz'schen Erreger bilden, der auf grössere Entfernungen wirkt als ein einfacher Righi'scher Oscillator, da die von ihm ausgesandte elektrische Strahlung eine grössere Wellenlänge besitzt. Wir kommen damit auf eine bereits von Hrn. M. Ascoli[2]) ausgesprochene Ansicht über die Wirkungsweise der Drähte zurück.

---

1) M. Tietz, l. c.
2) M. Ascoli, l. c.

Verfolgt man jedoch diese Ansicht weiter, so stösst man auf Schwierigkeiten. So leuchtet es ein, dass sie auf die Theorie des einfachen Righi'schen Oscillators den Rückschluss erlaubt, dass die durch ihn hervorgerufene Schwingung in ihrer Wellenlänge nicht allein von den Dimensionen der die Oelfunkenstrecke bildenden Kugeln, sondern auch von der Capacität der Zuführungskugeln abhängig sei. Da dies nun nach den Untersuchungen Hrn. Righi's jedenfalls der Sachlage nicht entspricht[1]), so wird man die gegebene Erklärung der Wirkungsweise der Drähte kaum für ausreichend erklären können.

Es muss in der That bei näherer Ueberlegung äusserst zweifelhaft erscheinen, ob die mangelhafte Homogenität in der Form und dem Materiale eines durch zwei Kugeln, zwei leitende Funkenstrecken und zwei Drähte gebildeten Erregers eine einheitliche Wirkung desselben zu stande kommen lässt. Ich kam deshalb zu der Ueberzeugung, dass, namentlich an den Luftfunkenstrecken, eine grössere Reflexion der Elektricitätsbewegung auftreten müsste, was mir um so wahrscheinlicher erschien, als nach den von Hrn. v. Geitler[2]) aufgestellten Regeln über die Reflexionserscheinungen bei Drahtwellen schon der Uebergang von einer Kugel in einen Draht eine teilweise Reflexion derselben bewirken muss. Der Effect solcher Reflexionserscheinungen in der hier behandelten Erregercombination ist leicht zu übersehen; es wird in demselben nicht nur die eine oben geschilderte Schwingung des ganzen Systems herrschen, sondern es werden sich in ihm mehrere Oscillationen superponiren: es wird auch die Schwingung, welche in dem Erreger herrscht, wenn keine Drähte angehängt sind und vielleicht eine Eigenschwingung jedes der beiden angehängten Drähte auftreten.

Eine Prüfung dieser Ansicht ist unschwer vorzunehmen; ist sie richtig, so muss die Resonanzcurve bei genauerer Untersuchung ausser dem von Hrn. Tietz gefundenen Maximum noch andere, wenn auch vielleicht bedeutend schwächere Maxima zeigen.

1) A. Righi, Die Optik der elektrischen Schwingungen, deutsch von Dessau, p. 14. Leipzig 1898.

2) J. v. Geitler, Wied. Ann. **49.** p. 184. 1893.

Um die Messung mit der nötigen Genauigkeit ausführen zu können, wählte ich die dem Erreger angehängten Drähte nur relativ kurz, nämlich 45 cm lang. Sie waren von Kupfer

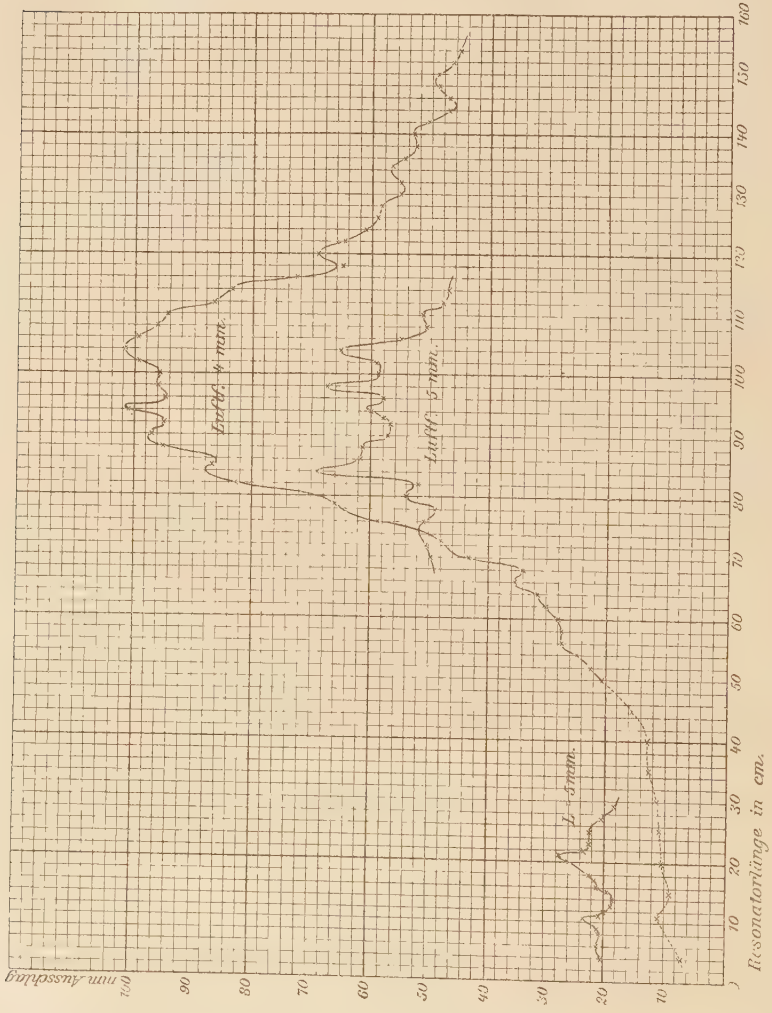

Fig. 4.

und 0,9 mm stark. Als Empfänger diente der schon oben verwandte, mit Stanniolstreifen versehene Resonator. Da von vornherein eine Beeinflussung der Verhältnisse durch die Länge der Luftfunkenstrecken zu erwarten war (auch Tietz

schreibt zur Erreichung einer deutlichen Resonanzwirkung sehr kleine Luftfunken vor), wurde die Resonanzcurve für mehrere Längen derselben aufgenommen. Die Aufnahme der Resonanz-

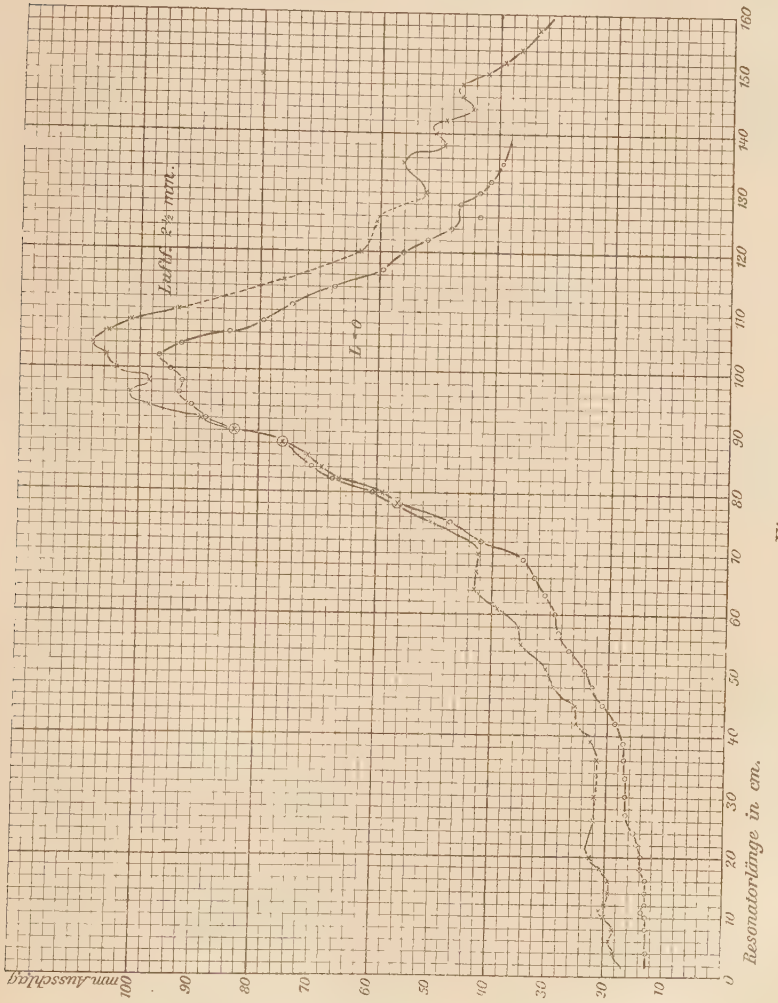

Fig. 5.

curve für fehlende Luftfunkenstrecken stiess zunächst insofern auf Schwierigkeiten, als nur Ausschläge von 1—2 Scalenteilen zu erhalten waren, wenn nur die 0,7 mm lange Oelfunkenstrecke eingeschaltet war. Ich versah deshalb die Drähte mit

zwei Kugeln von 1 cm Radius und brachte diese mit den Erregerkugeln in Berührung. Ihnen wurde dann durch zwei orthogonal zur Axe des Erregers angeordnete Funkenstrecken von ca. 3 mm Länge die Ladung zugeleitet. Die durch diese Anordnung etwas veränderte Capacität des primären Leitersystems äussert sich bei der erhaltenen Curve in einer geringen Verschiebung des Resonanzmaximums (vgl. Fig. 5). Die Aufnahme einer Resonanzcurve nimmt drei bis vier Stunden in Anspruch. Es gelingt deshalb nicht immer, die Wirkung des Unterbrechers und des Erregers constant zu erhalten, und man ist infolgedessen oft gezwungen, eine halb vollendete Messung abzubrechen. Um die Beobachtungszeit etwas abzukürzen, wurde daher an einigen weniger wichtigen Stellen nur der ungefähre Verlauf der Curve festgestellt; diese Stellen sind in der Zeichnung punktirt angegeben.

Die gewonnenen Resultate finden sich in Figg. 4 und 5 graphisch verzeichnet. Die angegebenen Ausschläge sind wieder Mittelwerte aus je 4—5 untereinander wenig differirenden Ablesungen. Sämmtliche Curven zeigen ausser dem grossen, der Gesamtschwingung entsprechenden Maximum deutlich kleinere Maxima an denselben Stellen und mit derselben Periode wie die Resonanzcurve, welche für den Erreger ohne Drähte erhalten wurde. Es geht daraus aufs deutlichste hervor, dass auch bei angehängten Drähten die ursprüngliche Schwingung des Oscillators fortbesteht, wobei besonders beachtenswert ist, dass sie auch bei fehlender Luftfunkenstrecke, allein vermöge der Unregelmässigkeit in der Form des durch Erregerkugeln und Drähte gebildeten Erregers, erhalten bleibt. Dagegen sind, wie das Fehlen weiterer Maxima zeigt, Eigenschwingungen der Drähte nicht vorhanden, was wohl auf ihre einseitige Verbindung mit der Inductionsspule zurückzuführen ist.

Mit dem im Vorstehenden erbrachten Beweise, dass ein mit beiderseits frei ausgespannten Drähten versehener Righi'scher Oscillator zwei superponirte Wellensysteme aussendet, ist diese Modification desselben auf jene Art von Erregern zurückgeführt, welchen J. v. Geitler unter dem Namen von „complicirten Hertz'schen Erregern" mehrere Aufsätze gewidmet hat[1]),

1) J. v. Geitler, Wied. Ann. **55.** p. 513. 1895; **57.** p. 412. 1896; **66.** p. 999. 1898.

und die wiederum einen speciellen Fall der „gekoppelten Systeme“ Max Wien's bilden. [1])

Die hier verwandte Erregercombination weist jedoch eine Anzahl von Besonderheiten auf, die durch ihre eigentümliche Gestalt bedingt sind. Diese Besonderheiten lassen sich in zwei Klassen scheiden; sie haben entweder darin ihren Ursprung, dass die eine der zum complicirten Erreger verbundenen Capacitäten aus Drähten besteht, oder sie lassen sich auf die Anwesenheit der Luftfunken zurückführen.

Auf die erste Klasse werden wir durch die auffallende Erscheinung geführt, dass, während die Resonanzcurve für den Erreger ohne Drähte nur ein deutliches und im übrigen nur sehr schwach angedeutete Maxima zeigt, bei den Curven, welche für Resonanz bei angehängten Drähten erhalten wurden, fast sämtliche durch die ursprüngliche Schwingung des Erregers hervorgebrachten Maxima, auch die für recht grosse Längen des Resonators erhaltenen, von ungefähr derselben Stärke und durchweg bedeutend schärfer als die für den Oscillator ohne Drähte erhaltenen sind. Diese Erscheinung erklärt sich wohl durch die Annahme, dass die angehängten Drähte nicht allein, als Urheber der dem grossen Maximum der Resonanzcurve entsprechenden „grossen“ Welle, eine wellenerregende Capacität bilden, sondern zugleich die „kleine“ Welle, die ursprüngliche Schwingung des Erregers, fortleiten und sie weiterhin ausstrahlen. Dadurch wird dann gewissermaassen eine Vergrösserung der Strahlungsquelle der kleinen Schwingung erzielt, welche es bewirkt, dass nicht mehr, wie beim Erreger ohne Drähte, die Länge des Resonators, welche gleich der halben Wellenlänge ist, ausgezeichnet ist, sondern dass innerhalb eines grossen Gebietes alle Resonatorlängen gleichen Bedingungen unterliegen. Das einfachste Bild dieser Wirkungsweise der Drähte gewinnt man vielleicht, indem man die ganze Erregeranordnung als ein auseinandergeklapptes Lecher'sches Drahtsystem auffasst, in dem die beiden Erregerkugeln die Function der Primärleitung haben und die ihnen gegenüberstehenden Zuführungskugeln die secundären Capacitäten bilden, welche die Schwingungen der Erregerkugeln auf die

1) Max Wien, Wied. Ann. 61. p. 151. 1897.

Drähte übertragen. Die Anwesenheit der Luftfunkenstrecken dürfte die Verhältnisse für diese Uebertragung nur noch günstiger gestalten.

Es lässt sich nun beobachten, dass auch hier, wie bei dem Lecher'schen System, die Elektricitätsbewegung in den Drähten nicht einfach den Impulsen der Primärleitung folgt, sondern dass die Drähte selber Schwingungen ausführen. Solche in den Drähten erregten Schwingungen müssen nämlich, da sie sich in einer vollkommen metallischen Leitung bewegen, eine weit geringere Dämpfung besitzen, wie die ursprünglichen Erregerschwingungen, und diese geringere Dämpfung lässt sich im vorliegenden Falle thatsächlich beobachten. Sie

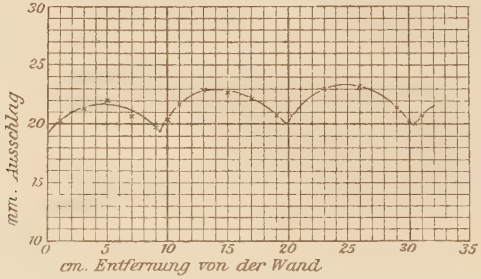

Fig. 6.

geht einerseits schon aus dem erwähnten Umstande hervor, dass die der kleinen Welle entsprechenden Resonanzmaxima für einen mit Drähten versehenen Erreger meistens schärfer sind als für einen solchen ohne Drähte; noch deutlicher tritt sie jedoch hervor, wenn man die durch einen Erreger mit Drähten an einer Metallwand erzeugten stehenden Wellen mit denen vergleicht, welche man ohne Anwendung derselben erhält. Fig. 6 enthält eine graphische Darstellung der bei der Ausmessung der ersteren durch einen 10,5 cm langen Resonator erhaltenen Resultate. Ein Vergleich derselben mit Fig. 3 zeigt den Unterschied in der Dämpfung aufs deutlichste.

Nachdem so das Bestehen einer durch die ursprüngliche Oscillation des Erregers in den Drähten ausgelösten Schwingung festgestellt worden ist, steht man sofort vor der weiteren Frage, ob diese Schwingung eine der möglichen Oberschwingungen der Drähte ist und damit je nach der Länge derselben in Bezug auf die ihr eigene Wellenlänge etwas von der ur-

sprünglichen Erregerschwingung abweicht, oder ob sie in dieser Hinsicht mit derselben völlig übereinstimmt. Für die erstere Auffassung scheint der Umstand zu sprechen, dass in den in Figg. 4 und 5 dargestellten Resonanzcurven die Lage der kleinen Maxima vielfach nicht mit der durch die Wellenlänge von 10,5 cm geforderten zusammenfällt. Die Erscheinung zeigt sich besonders deutlich in der Nähe des grossen Maximums. Um auf diese Anomalie näher eingehen zu können, stelle ich in der folgenden Tabelle die Lage der kleinen Maxima, soweit sie sich in der Nähe des grossen Resonanzmaximums erkennen lassen, für die verschiedenen Curven zusammen.

Resonatorlängen in Centimetern, für welche kleine Maxima auftreten. Länge der Drähte: 45 cm (grosses Maximum für $R = 104$ cm).

Maximum, entsprechend	$L = 5$ mm		$L = 4$ mm		$L = 2^1/_2$ mm		$L = 0$ mm	
$R = {}^8/_2\,\lambda$	84		84		84		85	
${}^{17}/_4\,\lambda$	89	$d =$	89	$d =$	90	$d =$	91	$d =$
${}^9/_2\,\lambda$	94,5	10,5	94,5	10,5	95,5	11,5	96	11
${}^{19}/_4\,\lambda$	98	9,5	98	9,5	100,5	8,5	102	8
${}^{10}/_2\,\lambda$	104		104		104		104	
${}^{21}/_4\,\lambda$	110		110,5	10,5	108			9
${}^{11}/_2\,\lambda$			114,5				113	
${}^{23}/_4\,\lambda$			120					

L bedeutet die Länge der Luftfunken, R die Resonatorlänge, d die Differenz zwischen den durch Klammern verbundenen Angaben.

Vergleicht man nun die in der Tabelle enthaltenen Angaben miteinander, so sieht man, dass die anomale Lage der kleinen Maxima lediglich darin besteht, dass dieselben von beiden Seiten gegen das grosse Resonanzmaximum zusammengeschoben erscheinen, und zwar um so stärker, je schärfer das grosse Maximum hervortritt. In einiger Entfernung von demselben deckt sich jedoch ihre Lage — abgesehen von innerhalb der Beobachtungsfehler liegenden Abweichungen — fast immer mit der durch die Wellenlänge des Erregers ohne Drähte geforderten. Es dürfte daraus hervorgehen, dass die Verschiebung der kleinen Resonanzmaxima lediglich durch die Anwesenheit des grossen Maximums hervorgerufen wird, also secundärer Natur ist. Da ich nun auch für andere Längen

der Drähte keine andere systematische Abweichung als die genannte beobachten konnte, so glaube ich schliessen zu müssen, dass die von den Drähten ausgesandte kleine Schwingung eine Periode besitzt, welche vollkommen mit der der ursprünglichen Welle des Erregers übereinstimmt. Dieses auf den ersten Blick etwas befremdende Resultat würde vielleicht in dem Vorhandensein der Verbindungen mit dem Inductorium seine Erklärung finden. Übereinstimmend mit dem erhaltenen Resultate ist es, dass Versuche, welche darauf abzielten, bei gewissen Längen der Drähte eine Abstimmung zwischen ihnen und den ursprünglichen Erregerschwingungen zu constatiren, erfolglos blieben, indem die Resonanzcurve die kleinen Maxima stets in ungefähr derselben Stärke zeigte. Im ganzen muss jedoch zugegeben werden, dass dem Ergebnis wegen der Kleinheit der benutzten Wellen einige Unsicherheit anhaftet. Um die Frage sicher entscheiden zu können, müsste man Apparate von so grossen Dimensionen benutzen, dass ihre Verwendung innerhalb der Grenzen eines Laboratoriums auf Schwierigkeiten stossen würde.

In Bezug auf die zum Inductorium führenden Zuleitungsdrähte ist noch zu bemerken, dass sich auch in ihnen Schwingungen von der Periode der ursprünglichen Erregerschwingung ausbilden müssen, und dass auf diese die starken Störungen in der Resonanzcurve zurückzuführen sind, welche resultiren, wenn dieselben nicht genau senkrecht auf den Oscillator zugeführt werden.

Die zweite Klasse von Eigentümlichkeiten unserer Erregercombination betrifft den Einfluss der Grösse der Luftfunkenstrecken auf die quantitativen Verhältnisse der von ihm ausgesandten Wellensysteme. Ein Vergleich der für verschiedene Längen der Luftfunken aufgenommenen Resonanzcurven (Figg. 4 und 5) zeigt, dass dieser Einfluss ein doppelter ist. Zunächst zeigt die Aenderung in der Intensität des Ansprechens eines 10,5 und eines 104 cm langen Resonators, dass das Amplitudenverhältnis der beiden Schwingungen sich mit der Länge der Luftfunken ändert, und zwar derart, dass die kleine Welle mit zunehmenden Luftfunkenstrecken relativ stärker, die grosse Welle dagegen verhältnismässig schwächer wird. Der Umstand, dass die Spitze des Resonanzmaximums, welches der grossen Schwingung entspricht, mit abnehmenden Funkenstrecken

immer schärfer wird, ergiebt eine zweite Wirkung: Der grosse galvanische Widerstand der Luftfunkenstrecken verursacht eine mit ihrer Länge um so grösser werdende Dämpfung der Schwingungen des gesamten Systems. Ein Bild von der Grösse der beschriebenen Abhängigkeit der Amplituden und der Dämpfung giebt die in Fig. 7 dargestellte Curve, welche die Längen der Luftfunkenstrecken als Abscissen, die Verhältnisse der Ausschläge des Resonators von 104 cm zu denen des 10,5 cm langen als zugehörige Ordinaten enthält. Da es bezeichnend ist, dass dieses Verhältnis für kleiner werdende Luftfunken fortwährend ansteigt, trotzdem die Ausschläge der beiden Resonatoren für eine Funkenlänge von 2,5 bez. 3 mm ein starkes Maximum erreichen, das übrigens einfach darauf zurückzuführen ist, dass für diese Länge die verwandten Apparate die beste Wirkung ergeben[1]), so stelle ich in der folgenden Tabelle diese Einzelausschläge und ihr Verhältnis für einige Luftfunkenstrecken zusammen.

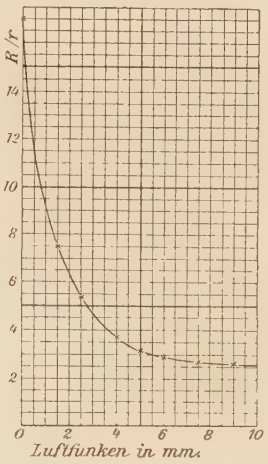

Fig. 7.

L	R	r	R/r
9	8,4	3,2	2,6
7,5	21,1	7,7	2,7
6	40,0	14.0	2,9
5	57,3	17,9	3,2
4	85,0	23,0	3,7
2,5	121,5	22,5	5,4
1,5	109,5	14,6	7,5
0	87	5	17,0

L bedeutet die Länge der Luftfunken, R und r sind die einem Resonator von 104 bez. 10,4 cm Länge entsprechenden Ausschläge.

[1]) Es dürfte dieses Maximum im wesentlichen mit dem Maximum der Wirkung identisch sein, welches Hr. Tietz für eine gewisse, von den Dimensionen der Apparate abhängige Funkenanzahl findet.

Uebereinstimmend mit den angegebenen Anschauungen über die Wirkungsweise der Luftfunken ist die Beobachtung, dass die Ausschläge für einen 104 cm langen Resonator im allgemeinen zunahmen, je mehr die Oberfläche der Kugeln, zwischen denen sie sich bildeten, oxydirt war. In der That wird in diesem Falle die von den hinübergerissenen Metallteilchen herrührende grössere Leitfähigkeit der Funkenstrecken sowohl die Dämpfung der grossen Welle vermindern als auch vermöge der vergrösserten Homogenität des Erregers die Amplitude der kleinen Welle verkleinern, die der grossen vergrössern.

Durch die beschriebenen Untersuchungen dürfte die Wirkungsweise eines Righi'schen Erregers mit angehängten, beiderseits frei ausgespannten Drähten klargelegt sein. Mit Hülfe der gewonnenen Ansichten ist jetzt auch unschwer eine Lösung für die oben angedeutete Schwierigkeit in betreff der Wirkungsweise des einfachen Righi'schen Erregers zu finden. Auch ein solcher wird streng genommen als ein complicirter Erreger im Sinne v. Geitler's aufzufassen sein, welcher zwei übereinander lagernde Wellensysteme aussendet, ein von den beiden Erregerkugeln herrührendes und ein zweites, das durch sie und die durch die Luftfunkenstrecken leitend mit ihnen verbundenen Zuführungskugeln verursacht wird. Da nun jedoch bei der gebräuchlichen Anordnung des Righi'schen Erregers die Luftfunkenstrecken verhältnismässig sehr gross sind, die Capacität der Zuführungskugeln aber meistens nur klein ist, so wird die letztere Schwingung so schwach sein und eine so starke Dämpfung besitzen müssen, dass sie gegen die andere, unter viel günstigeren Bedingungen arbeitende Schwingung gar nicht in Betracht kommt und auch thatsächlich nicht zu beobachten ist.

Für Versuche mit der bei der praktischen Ausführung der Funkentelegraphie gebräuchlichen Anordnung der Drähte benutzte ich ebenfalls die für das Laboratorium bequemere horizontale Anordnung von Erreger und Empfänger. Als Luftleitung wurde für den Erreger einer der oben benutzten Drähte, für den Resonator wieder ein Stanniolstreifen verwendet. Der Erreger wurde durch die Wasserleitung, der Resonator durch Verbindung mit der Gasleitung des Instituts zur Erde abgeleitet. Da die Summe der Uebergangswiderstände beider

Erdleitungen nur ungefähr 4 Ω betrug, so war gute Erdverbindung als gesichert anzusehen. Um die etwas zu starke Wirkung abzuschwächen, wurde in jede Erdleitung noch ein Flüssigkeitswiderstand eingeschaltet.

Es ist vorauszusehen, dass diese Anordnung des Erregers in Bezug auf die Wellenlänge einer eventuellen Schwingung des Gesamtsystems von der bisher benutzten abweichen, im übrigen jedoch ein dieser ganz ähnliches Verhalten zeigen wird. Dementsprechend findet auch Hr. Tietz für eine ähnliche Versuchsanordnung kein Resonanzmaximum, sondern nur

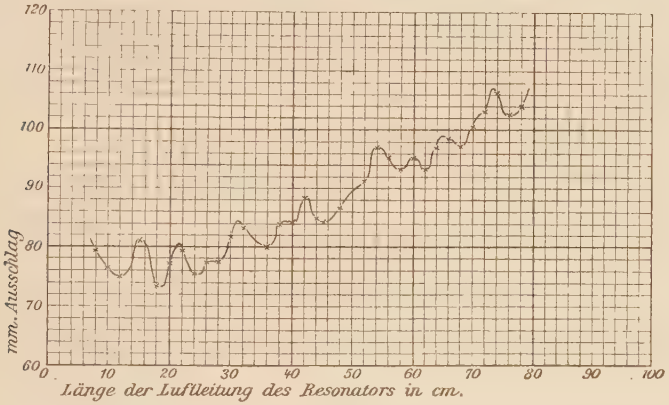

Fig. 8.

eine allmähliche Zunahme der Wirkung mit der Länge der Luftleitung des Empfangsapparates.

Auch mir ist es nicht gelungen, für eine bestimmte Länge der Luftleitung am Resonator ein grosses, hervorstechendes Maximum und damit die Existenz einer durch die Drähte hervorgebrachten längeren Welle nachzuweisen; wohl aber fand ich, wie die in Fig. 8 dargestellte Curve zeigt, deutlich kleinere Maxima, welche eine Periode besitzen, die der vom Erreger ohne Drähte ausgesandten Wellenlänge entspricht. Eine zwanglose Erklärung des Auftretens dieser Maxima ist mir nicht gelungen. Durch ihr Vorhandensein dürfte aber das Bestehen der ursprünglichen Schwingung des Erregers als gesichert anzusehen sein.

Obwohl sich bei der vorliegenden Anordnung eine durch die Verwendung der Drähte bedingte Oscillation von grösserer

Wellenlänge nicht nachweisen liess, glaube ich dennoch das Vorhandensein einer solchen annehmen zu müssen. Es scheint mir nämlich ohne eine solche Annahme der Umstand kaum erklärlich, dass man bei constanter Luftleitung am Erreger mit der Länge der des Resonators fortwährend wachsende Ausschläge erhält, wie dies Hr. Tietz gefunden hat und auch ich beobachten konnte, selbst bei einer Versuchsreihe, wo die Luftleitung am Empfänger bis zum Zwanzigfachen der des Erregers betrug. Wenn man weiter beobachten kann, dass das Ansteigen der Wirkung ein fast vollkommen lineares ist, so dürfte dies nur darauf hindeuten, dass diese Wellen von einer ganz anderen Grössenordnung sind, als die, welche einem einfachen Righi'schen Erreger zukommen.

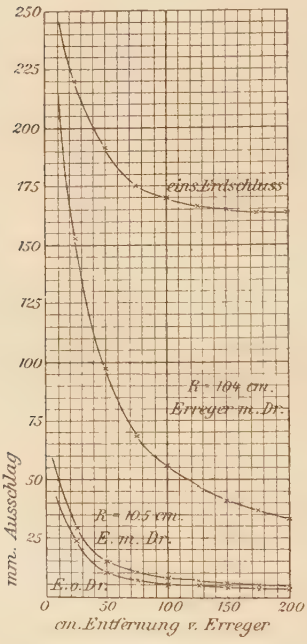

Fig. 9.

Auf das Vorhandensein einer solchen grösseren Schwingung scheinen mir auch die vorzüglichen Resultate hinzudeuten, welche Marconi mit einem neuerdings für das Telegraphiren auf weite Entfernungen verwandten Aufgabeapparate [1]) erzielte, welcher einfach aus zwei Kugeln von 2,5 cm Durchmesser besteht, von denen die eine mit der Luftleitung, die andere mit der Erde verbunden ist, und zwischen denen der Funke nicht in Oel, sondern in Luft überspringt. Bei diesem Erreger müssen nämlich die lediglich durch die beiden Kugeln erregten Schwingungen so wenig intensiv und von so starker Dämpfung sein, dass auf sie die Wirkung des Apparates schwerlich zurückgeführt werden kann.

Zum Schlusse will ich noch einige Resultate anführen, welche ich für die Abnahme der elektrischen Strahlung der verwandten Erregercombination erhielt. In Fig. 9 ist die Abnahme graphisch dargestellt. Es zeigt sich, dass die Inten-

1) Vgl. Elektrotechn. Zeitschr. XX. p. 289. 1899.

sität des Ansprechens eines auf die *kleine* Welle abgestimmten Resonators nach Anhängung der Drähte im grossen und ganzen in derselben Weise abnimmt, wie bei einem einfachen Righi'schen Erreger. Das Bild, welches die graphische Darstellung der Abnahme der Ausschläge für einen auf die *grosse* Welle abgestimmten Resonator ergiebt, erscheint einfach als eine Vergrösserung des für die kleine Welle erhaltenen. Die Abnahmecurve für einen einseitig an die Erde gelegten Erreger und Resonator wurde bei gleichen Luftleitungen derselben aufgenommen. Die Form derselben versuchte ich zunächst als eine Superposition der Wirkung der ursprünglichen Erregerschwingung und der einer grösseren Welle zu deuten; eine solche Deutung dürfte aber wohl kaum als notwendig erscheinen.

Resultate.

Durch die im Vorstehenden dargestellten Untersuchungen dürfte die Frage, welche Beeinflussung die Länge der von einem Righi'schen Erreger ausgesandten elektrischen Wellen erleidet, wenn der Primärleitung Drähte angehängt werden, klargestellt sein.

Die gewonnenen Resultate lassen sich folgendermaassen zusammenfassen:

Ein mit beiderseits frei ausgespannten Drähten versehener Righi'scher Erreger sendet zwei superponirte Wellensysteme aus, von denen das eine hinsichtlich seiner Erzeugung und seiner Wellenlänge mit dem vom Erreger ohne Drähte ausgesandten übereinstimmt, das andere durch die Gesamtschwingung des aus Erregerkugeln und den mit ihnen durch die Luftfunken leitend verbundenen Drähten gebildeten Leitersystems hervorgebracht wird und eine entsprechend grössere Wellenlänge besitzt.

Die Wirkung der ursprünglichen Schwingung des Erregers wird durch die Anwesenheit der Drähte verstärkt, indem in ihnen Schwingungen von derselben Periode und geringerer Dämpfung erregt werden, die ihrerseits wieder zur Strahlung beitragen.

Mit zunehmenden Luftfunkenstrecken nimmt der Wert des Verhältnisses der Amplitude der Gesamtschwingung zur Ampli-

tude der ursprünglichen Schwingung des Erregers ab. Die Gesamtschwingung zeigt eine mit der Länge der Luftfunken wachsende Dämpfung.

Wurde nur ein Draht am Erreger frei ausgespannt, der andere dagegen durch eine Erdleitung ersetzt, so war mit Hülfe der vorhandenen Beobachtungsmittel nur die ursprüngliche Schwingung des Erregers sicher nachzuweisen. Das Vorhandensein einer grösseren Schwingung ist zwar anzunehmen, aber ihre Wellenlänge war nicht messbar. Im übrigen gehen jedoch bei dieser Versuchsanordnung die Schwingungsvorgänge im Erreger in ganz ähnlicher Weise vor sich, wie bei Anhängung von beiderseits frei ausgespannten Drähten.

Zum Schlusse sei es mir gestattet, meinem hochverehrten Lehrer, Hrn. Prof. Dr. Wachsmuth, für die Anregung zu dieser Arbeit meinen herzlichsten Dank auszusprechen.